

基于交流电流下垂特性控制的VSC建模和稳定性分析

赵雨童,高飞,张博深

(上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240)

摘要:在直流微电网中,下垂控制常被用来实现直流母线电压的稳定和电压源型换流器(VSC)功率的准确分配,已有的下垂控制特性大多基于直流变量,响应速度慢且结构复杂。为此提出了一种基于交流侧电流的 I_d -V下垂特性,其与单闭环控制VSC结合,系统结构简单、成本低、响应速度快,可以实现直流母线电压的快速稳定,并设计了自适应下垂系数以实现准确的功率分配。建立了传统 I -V下垂控制系统和 I_d -V下垂控制系统的状态空间平均模型,并基于建立的模型绘制特征根轨迹分析系统的小信号稳定性。通过仿真验证了稳定性分析结果的正确性。仿真结果表明 I_d -V下垂控制系统能够实现准确的功率分配和直流母线电压的稳定,且响应速度相比传统 I -V下垂控制系统更快。

关键词:直流微电网;下垂特性;电压源型换流器;功率分配;状态空间法;特征根轨迹;响应速度

中图分类号:TM 761;TM 46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105034

0 引言

随着新能源的大量使用,光伏电池板、风力发电机和微型燃气轮机等分布式发电装置日渐成为满足负荷增长需求、减少环境污染、提高能源综合利用效率和供电可靠性的一种有效途径^[1]。在分布式能源的增长趋势下,直流微电网技术受到了广泛关注。直流微电网可以单独为本地负载供电,即运行在孤岛模式;也可以在并网模式下运行,与电网进行能量交换^[2]。直流微电网能够实现2种模式的灵活切换,且相较于传统大电网没有无功损耗和相位不匹配的问题,因而更适用于分布式新能源的接入^[3]。

下垂控制是在直流微电网中广泛使用的成熟技术,能够控制直流母线电压的稳定且精准地分配分布式能源的功率输出^[4]。已有的下垂特性有:以直流电压为反馈量给出直流电流参考值的 I -V下垂特性、以直流电压为反馈量给出输出功率参考值的 P -V下垂特性、以直流电流为反馈量给出直流电压参考值的 V - I 下垂特性和以输出功率为反馈量给出直流电压参考值的 V - P 下垂特性^[5]。这些传统的下垂特性均能够实现稳定直流母线电压和准确分配分布式能源功率,但都是基于双闭环控制的电压源型换流器VSC(Voltage Source Converter)^[6-7],其结构复杂,所需要的传感器较多,成本较高,且响应时间是单闭环控制VSC的10倍^[8]。

本文提出了一种新型的下垂特性,即以直流电

压为反馈量给出交流电流参考值的 I_d -V下垂特性,相比于传统下垂特性不需要外环控制,简化了系统结构,减少了传感器数目,降低了成本,并且填补了交流变量在直流微电网下垂特性中的研究空白。

在传统下垂控制的特性下,系统可以通过设置下垂系数来达到准确控制分布式能源直流侧功率输出的目标^[8-9]。然而,由于 I_d -V下垂特性没有直接控制直流侧变量,所以在调节直流侧功率分配上的精确度下降。自适应的下垂特性是提升下垂控制功率分配精度、改善系统性能的有效手段^[10-11]。文献[12-13]采用自适应下垂控制有效地改善了由各分布式能源输出阻抗和线路阻抗的差异导致的功率分配不准确。为提升功率分配精度,本文设计了自适应的下垂系数来解决交流侧电压和电阻对 I_d -V下垂控制系统的功率分配的影响,实现了直流侧功率的准确分配。

针对直流微电网的稳定性分析,基于状态空间建模的特征根迹法是准确有效的系统稳定性分析方法^[15]。文献[16]对传统下垂特性控制下的VSC建立了状态空间模型,并且绘制了特征根轨迹,对比分析了不同传统下垂特性控制下的VSC稳定性。文献[17-18]建立了直流微电网的状态空间模型,分别研究了母线电压控制器和有源负载对微电网稳定性的影响。

本文对含自适应下垂系数的 I_d -V下垂控制VSC建立状态空间模型,并与传统的 I -V下垂控制系统的状态空间模型进行对比,然后利用特征根迹法对比2种下垂特性下系统的稳定性;构建了由 I_d -V下垂控制VSC组成的微电网,建立微电网的状态空间模型并研究其稳定性;搭建 I_d -V下垂控制VSC、传统的 I -V下垂控制VSC与微电网的仿真模型,对稳

收稿日期:2021-02-10;修回日期:2021-04-01

基金项目:国家重点研发计划“战略性国际科技创新合作”重点专项(2020YFE0200400)

Project supported by the National Key R&D Program of Strategic-International Cooperation in S&T Innovation (2020YFE0200400)

定性分析和功率分配进行验证。

1 系统模型分析

1.1 VSC 内环结构

VSC的内环结构框图如图1所示,在旋转坐标系下分别控制 d 、 q 轴的交流电流。图中, v_{abc} 为交流侧三相电压; i_{abc} 为交流侧三相电流; m_{abc} 为VSC的调制信号; v_d 、 v_q 分别为VSC在 d 、 q 轴上的交流侧电压; i_d 、 i_q 分别为VSC在 d 、 q 轴上的交流侧电流; i_d^{ref} 、 i_q^{ref} 分别为 i_d 、 i_q 的参考值; e_d 、 e_q 分别为在 d 、 q 轴上的交流电源电压; L_s 为VSC的电感滤波器的电感; R_s 为电感滤波器的寄生电阻; C_{dc} 为VSC的输出电容,作用是增加稳定裕度和减小电流纹波; i_{dc} 为VSC直流侧电流; v_{dc} 为VSC直流侧输出电压; i_o 为滤波后的直流输出电流; ω 为交流电源的基波频率。通过锁相环PLL(Phase Locked Loop)模块得到交流电源的 d 轴电压的相位 θ 作为Park变换的同步信号,输入 abc/dq 变换模块。所有双闭环控制VSC的内环结构均如图1所示。

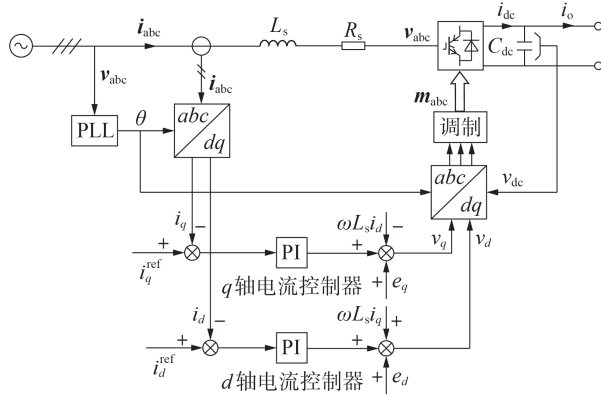


图1 VSC内环结构图

Fig.1 Inner-loop structure diagram of VSC

根据图1,电感滤波器的电压、电流关系为:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_d}{dt} = \omega L_s i_q - R_s i_d + e_d - v_d \\ L_s \frac{di_q}{dt} = -\omega L_s i_d - R_s i_q + e_q - v_q \end{cases} \quad (1)$$

结合式(1)和图1中控制回路,VSC为多输入多输出MIMO(Multiple Input Multiple Output)系统,可以通过解耦项将该MIMO系统解耦为2个单输入单输出SISO(Single Input Single Output)系统,即在 d 轴和 q 轴分别控制有功功率和无功功率^[19]。这种解耦控制方法是 I_d - V 下垂特性通过控制 d 轴电流进而控制有功功率的理论基础。

1.2 传统 I - V 下垂控制系统模型

传统的下垂特性根据下垂控制回路输出的参考值设计VSC的外环控制回路。例如,传统 I - V 下垂

控制系统中,下垂控制器输出直流电流参考值,相应地,双闭环VSC的外环为直流电流环。图2为传统 I - V 下垂控制系统的简化原理图,图中 V_o 为母线电压参考值。

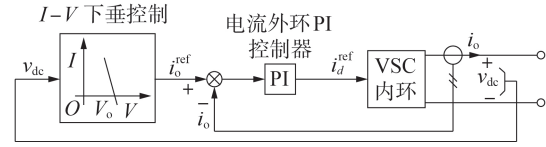


图2 传统 I - V 下垂控制系统结构图

Fig.2 Structure diagram of traditional I - V droop control system

下垂控制模块通过测量 v_{dc} ,根据式(2)计算出VSC直流输出电流参考值 i_o^{ref} ,电流外环PI控制器根据 i_o^{ref} 和 i_o 输出 d 轴电流内环参考值 i_d^{ref} 。单闭环VSC根据给出的 i_d^{ref} 控制分布式交流电源输出。

$$\frac{v_o - v_{dc}}{k} = i_o^{\text{ref}} \quad (2)$$

其中, k 为下垂系数。

1.3 I_d - V 下垂控制系统模型

与图2中传统 I - V 下垂控制系统相比, I_d - V 下垂控制系统直接给出了内环交流电流参考值,不需要设计相应的外环结构,因此减少了1个PI控制器,提升了系统响应速度,并且不需要测量直流侧电流,系统结构更加简单。 I_d - V 下垂控制系统的简化原理图如图3所示。

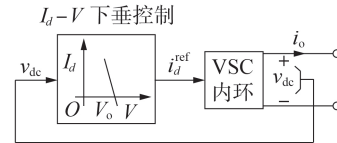


图3 I_d - V 下垂控制系统结构图

Fig.3 Structure diagram of I_d - V droop control system

I_d - V 下垂控制模块通过采集 v_{dc} ,根据式(3)直接输出 d 轴电流内环参考值 i_d^{ref} 。VSC的电流内环根据给出的 i_d^{ref} 控制分布式交流电源输出。

$$\frac{v_o - v_{dc}}{k} = i_d^{\text{ref}} \quad (3)$$

1.4 微电网模型

下垂控制主要是为了实现多机并联的功率分配以稳定直流母线电压,为了验证 I_d - V 下垂控制的可靠性,搭建了以 I_d - V 下垂特性控制的分布式交流电源并联供电的直流微电网,如图4所示。图中, L_{si} ($i=1,2$)为VSC i 的电感滤波器的电感; R_{si} 为电感滤波器的寄生电阻; R_{linei} 与 L_{linei} 为VSC i 输出端口的线阻与线感; C_i 为VSC i 的输出电容。

分布式交流电源通过图3所示的 I_d - V 下垂控制VSC维持直流母线电压稳定,为负载提供功率并控制分布式交流电源的功率分配。

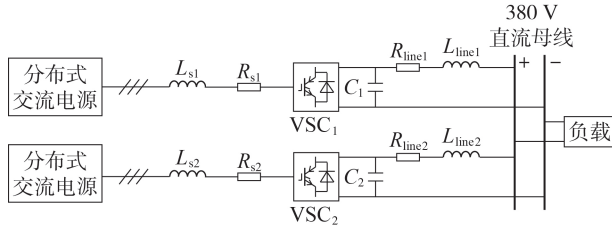


图4 直流微电网结构图

Fig.4 Structure diagram of DC microgrid

2 自适应 I_d -V下垂特性

2.1 I_d -V下垂控制系统的功率分配

在忽略直流侧线路阻抗的情况下,并联 I_d -V下垂控制系统的直流侧电压 v_{dc} 相等,由式(3)可知 d 轴电流与下垂系数成反比。

$$i_{d1} : i_{d2} : \dots : i_{dn} = \frac{1}{k_1} : \frac{1}{k_2} : \dots : \frac{1}{k_n} \quad (4)$$

其中, i_{di} 、 k_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 分别为VSC_{*i*}的 d 轴电流、下垂系数, n 为VSC数量。由此可见可以通过设置下垂系数来控制 d 轴电流输入。

根据交流侧与直流侧功率守恒可以得出:

$$P = v_{dc} i_{dc} = 1.5(v_{d1} i_{d1} + v_{q1} i_{q1}) \quad (5)$$

在大部分情况下,VSC被控制在单位功率因数模式,即 q 轴电流为0。联立式(1)和式(5),可得系统稳态时有:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{di_q}{dt} = 0 \\ v_d = e_d - R_s i_d \\ i_{dc} v_{dc} = 1.5 v_d i_d \end{cases} \quad (6)$$

电路在稳定工作情况下,电容电流为0,即 $i_o = i_{dc}$ 。根据式(4)和式(6)可得多个 I_d -V下垂控制系统并联的功率分配为:

$$P_1 : P_2 : \dots : P_n = i_{o1} : i_{o2} : \dots : i_{on} = \frac{3v_{d1} i_{d1}}{2v_{dc1}} : \frac{3v_{d2} i_{d2}}{2v_{dc2}} : \dots : \frac{3v_{dn} i_{dn}}{2v_{dcn}} \quad (7)$$

其中, P_i 、 i_{oi} 和 v_{dci} ($i = 1, 2, \dots, n$) 分别为VSC_{*i*}的输出功率、直流输出电流和直流侧电压。

由于并联下垂控制系统的直流侧电压 v_{dc} 相等,式(7)可以进一步化简为:

$$P_1 : P_2 : \dots : P_n = v_{d1} i_{d1} : v_{d2} i_{d2} : \dots : v_{dn} i_{dn} \quad (8)$$

由式(4)可知, I_d -V下垂控制系统可以通过设置下垂系数准确地控制 d 轴电流的分配。然而,各个VSC的 d 轴电压不同,导致输出功率与 d 轴电流不成比例。因此,通过设置下垂系数控制 I_d -V下垂控制系统的功率分配精度必然受到影响。

2.2 自适应调整的下垂特性

为实现 I_d -V下垂控制系统的精确功率分配,设计了如下自适应下垂系数:

$$k' = \frac{3v_d}{2v_{dc}} k = \frac{3(e_d - R_s i_d)}{2v_{dc}} k \quad (9)$$

其中, k' 为自适应下垂系数,可通过采集直流电压和 d 轴电流得到。自适应下垂系数可以调整下垂特性,使得VSC输出功率按照设置的下垂系数准确分配。

采用自适应下垂系数 k' 的 I_d -V下垂特性的控制方程为:

$$\frac{v_o - v_{dc}}{k'} = i_d^{\text{ref}} \quad (10)$$

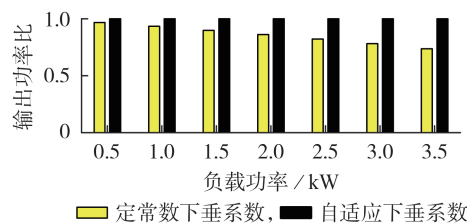
采用自适应下垂系数的 I_d -V下垂控制VSC功率分配为:

$$\begin{aligned} P_1 : P_2 : \dots : P_n &= \frac{3v_{d1}}{2v_{dc1} k'_1} : \frac{3v_{d2}}{2v_{dc2} k'_2} : \dots : \frac{3v_{dn}}{2v_{dcn} k'_n} = \\ &= \frac{3v_{d1}}{2v_{dc1} k'_1 (3v_{d1})} : \frac{3v_{d2}}{2v_{dc2} k'_2 (3v_{d2})} : \dots : \frac{3v_{dn}}{2v_{dcn} k'_n (3v_{dn})} = \\ &= \frac{1}{k'_1} : \frac{1}{k'_2} : \dots : \frac{1}{k'_n} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, k'_i 为VSC_{*i*}的自适应下垂系数。

由式(11)可以看出,采用自适应下垂系数的 I_d -V下垂控制VSC输出功率可以按照设置的下垂系数准确分配。

图5为 I_d -V下垂控制系统分别采用定常数下垂系数 k 和自适应下垂系数 k' 时分布式交流电源功率输出比例。2个并联VSC设置相等的下垂系数或自适应下垂系数,功率输出比值应该为1:1。由图5可以看出,采用定常数下垂系数的 I_d -V下垂控制系统,功率分配的精确度会随着负载功率的增加而下降,而采用自适应下垂系数的 I_d -V下垂控制系统能够实现功率的精确分配。

图5 不同负载情况下 I_d -V下垂控制系统的功率分配Fig.5 Power distribution of I_d -V droop control system under different load powers

3 自适应的 I_d -V下垂系统状态空间建模和根轨迹分析

3.1 I_d -V下垂控制系统状态空间建模

状态空间平均模型即在一个开关周期内求变量平均值的方法,并以状态方程的形式建立各变量间的关系,进而建立平均状态方程,该方法能消除VSC中高频纹波对各变量的影响。对建立的平均状态方程进行小信号分析,进而绘制特征根轨迹可以准确地研究系统稳定性。

I_d -V下垂控制系统的状态空间平均模型为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_1 \Delta \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_1 = [i_d, i_q, v_{dc}, X_{id}, X_{iq}]^T \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{x}_1$ 为 I_d -V下垂控制系统的状态变量; Δ 表示相应变量的微分形式; X_{id} 和 X_{iq} 为内环PI控制器中积分器的状态变量; $\mathbf{A}_1$ 的表达式如附录A式(A1)所示。

I -V下垂控制系统的状态空间平均模型为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{A}_2 \Delta \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_2 = [i_d, i_q, v_{dc}, X_{dc}, X_{id}, X_{iq}]^T \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{x}_2$ 为 I -V下垂控制系统的状态变量; X_{dc} 为电流外环PI控制器中积分器的状态变量; $\mathbf{A}_2$ 的表达式如附录A式(A2)所示。

直流微电网的状态空间平均模型为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_{MG} = \mathbf{A}_{MG} \Delta \mathbf{x}_{MG} \\ \mathbf{x}_{MG} = [i_{d1}, i_{d2}, i_{q1}, i_{q2}, v_{dc1}, v_{dc2}, i_{dc1}, i_{dc2}, X_{id1}, X_{id2}, X_{iq1}, X_{iq2}]^T \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{x}_{MG}$ 为直流微电网中的状态变量; $\mathbf{A}_{MG}$ 的表达式如附录A式(A3)所示。

对于建立的状态空间模型将通过 MATLAB 中的 LAT(Linear Analysis Tools)验证其准确性。

3.2 特征根轨迹与稳定性分析

基于建立的状态空间模型求取特征根,通过判断是否存在右半平面极点可以准确地判断系统的稳定性,通过改变系统参数来观察特征根的轨迹可以研究系统参数对稳定性的影响。

图6为传统 I -V下垂控制系统与 I_d -V下垂控制系统的特征根轨迹。2个系统采用相同的电路参数和控制参数,增加传统 I -V下垂特性下的电流外环控制带宽,绘制特征根轨迹与 I_d -V下垂控制系统特征根轨迹进行对比。对比2个系统的主导极点(即系统最右侧的点)可知, I_d -V下垂控制系统的主导极点始终在 I -V下垂控制系统的主导极点左侧,验证了 I_d -V下垂控制系统具有更好的动态性能和稳定性^[20]。

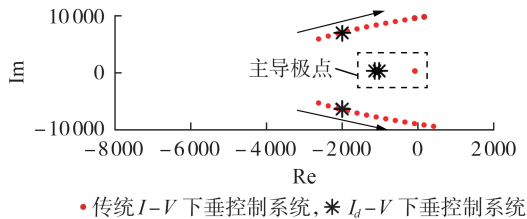


图6 I_d -V下垂控制系统与传统 I -V下垂控制系统的特征根轨迹

Fig.6 Eigenvalue trajectories of I_d -V droop control system and traditional I -V droop control system

随着自适应下垂系数 k' 的减小, I_d -V下垂控制系统的特征根向右半平面移动,并在 $k' < 1.2$ 时出现右半平面特征根,如图7所示。这说明随着自适应

下垂系数的减小, I_d -V下垂控制系统的稳定性下降,且当 $k' < 1.2$ 时系统会出现振荡。这一特性与传统 I -V下垂控制系统相似^[5]。

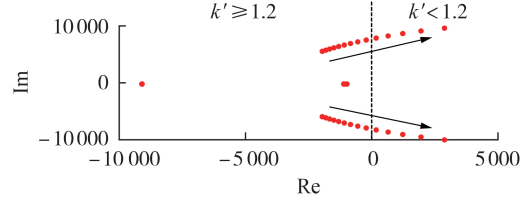


图7 自适应下垂系数从2降至0.3时 I_d -V下垂控制系统的特征根轨迹

Fig.7 Eigenvalue trajectory of I_d -V droop control system when adaptive droop gain decreases from 2 to 0.3

对2个VSC设置相同的自适应下垂系数并逐渐减小,直流微电网系统的特征根轨迹如图8所示。可以看出,随着自适应下垂系数的减小,直流微电网系统的特征根向右半平面移动,并在小于1.7时出现右半平面特征根。与单个 I_d -V下垂控制VSC相似,自适应下垂系数的减小会导致直流微电网系统的不稳定。

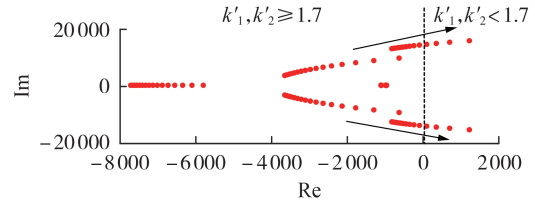


图8 自适应下垂系数变化时直流微电网系统的特征根轨迹(k'_1, k'_2 均从4降至1)

Fig.8 Eigenvalue trajectory of DC microgrid when both adaptive droop gains decrease from 4 to 1

4 仿真实验

为了验证本文提出的 I_d -V下垂特性的性能和稳定性分析的正确性,搭建了传统 I -V下垂控制系统与 I_d -V下垂控制系统的仿真模型,VSC参数见附录B表B1。

图9为传统 I -V下垂控制系统与 I_d -V下垂控制系统的直流电压响应仿真结果。2个系统在1.0 s前到达稳态,1.0 s时在直流母线电压参考值上加入阶跃信号。由图9可知,相比于传统 I -V下垂控制系统, I_d -V下垂控制系统的直流电压响应时间更短,超

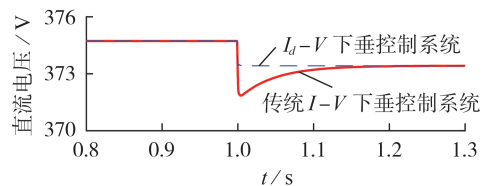


图9 直流电压响应

Fig.9 DC voltage response

调量更小,动态性能更优越,验证了由图6得出的结论。

图10为 I_d -V下垂控制系统的直流电压响应仿真结果。0.14 s之前,VSC直流侧输出稳定, $k' < 1.3$; 0.14 s时设置 $k' = 1.2$,VSC直流侧产生收敛的振荡且能达到稳态,系统依然稳定;0.18 s时设置 $k' = 1.1$,VSC直流侧产生发散的振荡,系统不稳定。仿真结果验证了图7中得到的自适应下垂系数稳定边界,也进一步验证了所建立的状态空间平均模型的正确性。

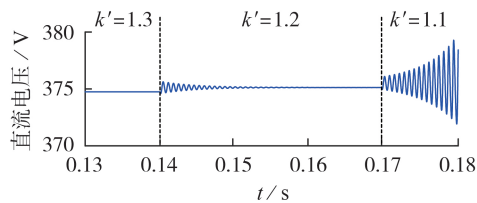


图10 自适应下垂系数从1.3降至1.1时 I_d -V下垂控制系统的直流电压响应

Fig.10 DC voltage response of I_d -V droop control system when adaptive droop gain decreases from 1.3 to 1.1

在MATLAB/Simulink中搭建如图4所示的直流微电网系统仿真模型,以验证直流微电网系统稳定性分析的正确性,利用 I_d -V下垂特性调节分布式交流电源功率分配的准确性以及维持电压的能力,直流微电网的参数见附录B表B2。

图11为 I_d -V下垂控制下分布式交流电源功率分配的仿真结果。2个 I_d -V下垂控制系统的下垂系数设置为 $k_1=1$ 和 $k_2=2$,对应的直流电流输出比例应为2:1。在0.5 s之前直流电流输出比例为 $i_{o1}:i_{o2}=8.748:4.407 \approx 1.98:1$,存在误差,0.5 s时自适应下垂系数在系统中投入使用,直流电流输出比例为 $i_{o1}:i_{o2}=8.804:4.402=2:1$,实现了准确的功率分配。

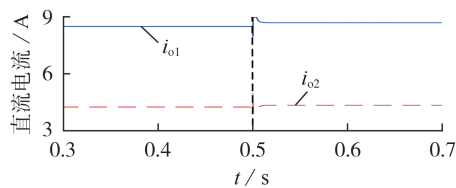


图11 并联 I_d -V下垂控制系统的直流电流输出

Fig.11 DC output current of two parallel I_d -V droop control systems

图12为直流微电网母线电压的仿真结果,在0.2 s之前,母线电压稳定,2个VSC的自适应下垂系数均设置为2;0.2 s时,2个VSC的自适应下垂系数均设置为1.8,母线电压产生收敛的振荡且能达到稳态,系统依然稳定;0.22 s时2个VSC的自适应下垂系数均设置为1.6,母线电压产生发散的振荡,系统不稳定。仿真结果验证了由图8得出的结论。

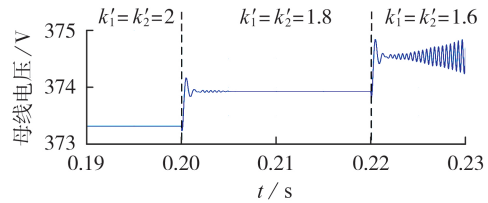


图12 直流微电网母线电压

Fig.12 Bus voltage of DC microgrid

5 结论

本文提出了一种新型下垂特性,拓宽了直流微电网中只基于直流变量的传统下垂特性,研究了交流电流在传统微电网中的下垂特性。在对比研究传统 I -V下垂特性与 I_d -V下垂特性后,得出以下结论:

(1)在特征根轨迹分析和仿真结果中,与传统的 I -V下垂控制系统相比, I_d -V下垂控制系统具有更好的动态性能和稳定性;

(2)采用自适应下垂系数时,并联 I_d -V下垂控制系统可以实现精确的功率分配,并通过仿真结果进行了验证;

(3)与传统 I -V下垂控制系统相似,随着下垂系数的减小, I_d -V下垂控制系统的稳定裕度也随之减小甚至会出现振荡失稳的现象。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] BEERTEN J, BELMANS R. Analysis of power sharing and voltage deviations in droop-controlled DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4588-4597.
- [2] 米阳, 蔡杭谊, 宋根新, 等. 考虑不匹配线阻的分布式储能单元荷电状态均衡研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4441-4451.
MI Yang, CAI Hangyi, SONG Genxin, et al. State-of-charge balancing research of distributed energy storage units with unmatched line impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4441-4451.
- [3] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [4] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1900-1913.
- [5] GAO F, BOZHKO S, COSTABEER A, et al. Comparative stability analysis of droop control approaches in voltage-source-converter-based DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2395-2415.
- [6] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [7] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于MMC的多端柔性直流输电

- 系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 397-404.
- YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 397-404.
- [8] ZHAO M, YUAN X, HU J, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2925-2937.
- [9] 刘一琦, 王建勋, 傅裕, 等. 直流微电网中不同网络结构的负荷功率分配精度研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 53-59.
- LIU Yiqi, WANG Jianxun, FU Yu, et al. Load power sharing accuracy for different network configurations of DC microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 53-59.
- [10] 马焕均. 微电网逆变器改进下垂控制技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- MA Huanjun. Research on improved droop control strategy of inverters in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [11] 李福东, 吴敏. 微网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 18-25.
- LI Fudong, WU Min. An improved control strategy of load distribution in an autonomous microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 18-25.
- [12] 王二永, 王帅. 自适应下垂系数的低压微电网功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 52-56.
- WANG Eryong, WANG Shuai. Power control strategy of low voltage microgrid based on adaptive droop coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 52-56.
- [13] 周晓倩, 艾芊. 基于自适应经济下垂控制的微电网分布式经济控制[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 50-55.
- ZHOU Xiaolian, AI Qian. Distributed economic control of microgrid based on adaptive economic droop control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 50-55.
- [14] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 795-806.
- LIU Ziwen, MIAO Shihong, FAN Zhihua, et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding DC microgrid based on adaptive droop characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 795-806.
- [15] KIMBALL W J, RASHEDUZZAMAN M, MUELLER A J. An accurate small signal model of inverter-dominated islanded microgrids using (dq) reference frame[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2014, 2(4): 1070-1080.
- [16] GAO F, ZHENG X, BOZHKO S, et al. Modal analysis of a PMSG-based DC electrical power system in the more electric aircraft using eigenvalues sensitivity[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(1): 65-76.
- [17] JEUNG Y, LE D D, LEE D. Analysis and design of DC-bus voltage controller of energy storage systems in DC microgrids [J]. IEEE Access, 2019, 7(12): 126696-126708.
- [18] BOTTRELL N, PRODANOVIC M, GREEN T C. Dynamic stability of a microgrid with an active load [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5107-5119.
- [19] SHAH S, PARSA L. Impedance modeling of three-phase voltage source converters in DQ, sequence, and phasor domains [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1139-1150.
- [20] YU K, AI Q, WANG S, et al. Analysis and optimization of droop controller for microgrid system based on small-signal dynamic model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 695-705.

作者简介:



赵雨童

赵雨童(1997—),男,安徽滁州人,硕士研究生,主要研究方向为直流微电网与换流器稳定性(E-mail: yutong.zhao@sjtu.edu.cn);

高飞(1985—),男,安徽淮南人,副教授,博士,主要研究方向为直流微电网控制与稳定性(E-mail: fei.gao@sjtu.edu.cn);

张博深(1995—),男,河南南阳人,博士研究生,主要研究方向为直流微电网与VSC稳定性(E-mail: boshen@sjtu.edu.cn)。

(编辑 李莉)

Modeling and stability analysis of VSC with droop characteristic based on AC current

ZHAO Yutong, GAO Fei, ZHANG Boshen

(Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In DC microgrid, droop control can achieve stable DC bus voltage and accurate power distribution of VSCs (Voltage Source Converters). The traditional droop control characteristics are mostly based on DC variables, with slow response speed and complex structure. Therefore, an I_d -V droop characteristic based on AC current is proposed, which is combined with single closed-loop controlled VSC to simplify the system structure, reduce the system cost, improve the response speed and rapidly achieve the stable DC bus voltage. Moreover, the adaptive droop gain is designed and adopted to achieve accurate power distribution. The state-space average models of I_d -V droop control system and I -V droop control system are established, and on this basis the eigenvalue trajectories are drawn to analyze the small-signal stability of the system. The correctness of stability analysis results is verified by simulation. The results show that, I_d -V droop control system can achieve accurate power distribution, and has faster response speed than I -V droop control system.

Key words: DC microgrid; droop characteristic; voltage source converter; power distribution; state-space approach; eigenvalue trajectory; response speed

附录 A

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s}(-R_s - K_{ip}) & 0 & A_{13}^1 & \frac{1}{L_s}K_{ii} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s}(-R_s - K_{ip}) & 0 & 0 & \frac{1}{L_s}K_{ii} \\ A_{31}^1 & A_{32}^1 & A_{33}^1 & A_{34}^1 & A_{35}^1 \\ -1 & 0 & A_{43}^1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

$$\left\{ \begin{aligned} A_{13}^1 &= \frac{2K_{ip}}{3L_s k} \frac{U_{\text{dcref}} - 2u_{\text{dco}}}{U_s - R_s i_{do}} \\ A_{31}^1 &= \frac{3}{2Cu_{\text{dco}}} \left[u_{do} + i_{do} K_{ip} - \omega L i_{qo} - \frac{2i_{do} K_{ip} R_s u_{\text{dco}}}{3k} \frac{u_{\text{dcref}} - 2u_{\text{dco}}}{(U_s - R_s i_{do})^2} \right] \\ A_{32}^1 &= \frac{3}{2Cu_{\text{dco}}} (u_{qo} + i_{qo} K_{ip} + \omega L i_{do}) \\ A_{33}^1 &= \frac{1}{C} \left(-\frac{3u_{do} i_{do}}{2u_{\text{dco}}^2} - \frac{3u_{qo} i_{qo}}{2u_{\text{dco}}^2} - \frac{3i_{do} K_{ip}}{2ku_{\text{dco}}} \frac{u_{\text{dcref}} - 2u_{\text{dco}}}{U_s - R_s i_{do}} + \frac{P_L}{u_{\text{dco}}^2} \right) \\ A_{34}^1 &= -\frac{1}{C} \frac{3i_{do}}{2u_{\text{dco}}} K_{ii} \\ A_{35}^1 &= -\frac{1}{C} \frac{3i_{qo}}{2u_{\text{dco}}} K_{ii} \\ A_{43}^1 &= \frac{2K_{ip}}{3k} \frac{U_{\text{dcref}} - 2u_{\text{dco}}}{U_s - R_s i_{do}} \end{aligned} \right.$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s}(-R_s - K_{ip}) & 0 & -\frac{1}{L_s} K_{ip} K_{vp} \left(\frac{1}{k} - \frac{P_L}{u_{\text{dco}}^2} \right) & \frac{1}{L} K_{ip} K_{vi} & \frac{1}{L_s} K_{ii} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s}(-R_s - K_{ip}) & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_s} K_{ii} \\ A_{31}^2 & A_{32}^2 & A_{33}^2 & A_{34}^2 & A_{35}^2 & A_{36}^2 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{k} + \frac{P_L}{u_{\text{dco}}^2} & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -\frac{K_{vp}}{k} + \frac{P_L K_{vp}}{u_{\text{dco}}^2} & K_{vi} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A2})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{31}^2 = \frac{3}{2Cu_{\text{dco}}} (u_{do} + i_{do}K_{\text{ip}} - \omega L_s i_{qo}) \\ A_{32}^2 = \frac{3}{2Cu_{\text{dco}}} (u_{qo} + i_{qo}K_{\text{ip}} + \omega L_s i_{do}) \\ A_{33}^2 = \frac{1}{C} \left(-\frac{3u_{do}i_{do}}{2u_{\text{dco}}^2} - \frac{3u_{qo}i_{qo}}{2u_{\text{dco}}^2} - \frac{3i_d K_{\text{ip}} K_{\text{vp}} P_L}{2u_{\text{dco}}^3} + \frac{P_L}{u_{\text{dco}}^2} + \frac{3i_d K_{\text{ip}} K_{\text{vp}}}{2ku_{\text{dco}}} \right) \\ A_{34}^2 = -\frac{1}{C} \frac{3i_{do}}{2u_{\text{dco}}} K_{\text{ip}} K_{\text{vi}} \\ A_{35}^2 = -\frac{1}{C} \frac{3i_{do}}{2u_{\text{dco}}} K_{\text{ii}} \\ A_{36}^2 = -\frac{1}{C} \frac{3i_{qo}}{2u_{\text{dco}}} K_{\text{ii}} \end{array} \right.$$

$$\mathbf{A}_{\text{MG}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s}(-R_s - K_{\text{ip}}) & 0 & A_{13}^{\text{MG}} & \frac{1}{L_s}K_{\text{ii}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s}(-R_s - K_{\text{ip}}) & 0 & 0 & \frac{1}{L_s}K_{\text{ii}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{31}^{\text{MG}} & A_{32}^{\text{MG}} & A_{33}^{\text{MG}} & A_{34}^{\text{MG}} & A_{35}^{\text{MG}} & -\frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & A_{43}^{\text{MG}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_{\text{Line1}}} & 0 & 0 & -\frac{R_{\text{line1}} + R_L}{L_{\text{Line1}}} & -\frac{R_L}{L_{\text{Line1}}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_L}{L_{\text{Line2}}} & -\frac{R_{\text{line2}} + R_L}{L_{\text{Line2}}} & 0 & 0 & \frac{1}{L_{\text{Line2}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_s}(-R_s - K_{\text{ip}}) & 0 & A_{8,10}^{\text{MG}} & \frac{1}{L_s}K_{\text{ii}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_s}(-R_s - K_{\text{ip}}) & 0 & 0 & \frac{1}{L_s}K_{\text{ii}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C} & A_{10,8}^{\text{MG}} & A_{10,9}^{\text{MG}} & A_{10,10}^{\text{MG}} & A_{10,11}^{\text{MG}} & A_{10,12}^{\text{MG}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & A_{11,10}^{\text{MG}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(A3)

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{13}^{\text{MG}} = A_{8,10}^{\text{MG}} = A_{13}^1 \\ A_{31}^{\text{MG}} = A_{10,8}^{\text{MG}} = A_{31}^1 \\ A_{32}^{\text{MG}} = A_{10,9}^{\text{MG}} = A_{32}^1 \\ A_{33}^{\text{MG}} = A_{10,10}^{\text{MG}} = \frac{1}{C} \left(-\frac{3u_{do}i_{do}}{2u_{\text{dco}}^2} - \frac{3u_{qo}i_{qo}}{2u_{\text{dco}}^2} - \frac{3i_{do}K_{\text{ip}}}{2ku_{\text{dco}}} \frac{u_{\text{dcref}} - 2u_{\text{dco}}}{U_s - R_s i_{do}} \right) \\ A_{34}^{\text{MG}} = A_{10,11}^{\text{MG}} = A_{34}^1 \\ A_{35}^{\text{MG}} = A_{10,12}^{\text{MG}} = A_{35}^1 \\ A_{43}^{\text{MG}} = A_{11,10}^{\text{MG}} = A_{43}^1 \end{array} \right.$$

附录 B

表 B1 VSC 参数

Table B1 Parameters of VSC	
参数	数值
交流电源 e	100 V
滤波电感 L_s	1 mH
寄生电阻 R_s	0.2 Ω
恒功率负载 P_L	1 500 W
母线电压参考值 V_o	380 V
自适应下垂系数 k'	2
电流内环比例系数 k_{ip}	10
电流内环比例系数 k_{ii}	10 000
直流电容 C	100 μF

表 B2 直流微电网参数

Table B2 Parameters of DC microgrid	
参数	数值
恒阻值负载 R_L	60 Ω
母线电压参考值 V_o	380 V
线路电感 L_{line1}	50 μH
线路电感 L_{line2}	80 μH
线路电阻 R_{line1}	0.1 Ω
线路电阻 R_{line2}	0.2 Ω
自适应下垂系数 k'_1	1
自适应下垂系数 k'_2	2